

# 非なるものへの挑戦:不安定現象を積極的かつ安全に利用するための力学



研究室紹介

中谷 彰 宏\*

Challenge to Non-Ordinary Problems: Dynamics for Active and Safe Applications of Instability Mechanism

Key Words : Deformable body mechanics, Non-linear dynamics, Instability, Bifurcation

## はじめに

知能・機能創成工学専攻および先導的融合工学講座が大阪大学大学院工学研究科の2020年4月の改組で発展的に解消されるのに伴い、マイクロダイナミクス研究室と非線形離散動力学研究室は統合され機械工学専攻機能構造学講座の領域の一つとして教育・研究を担うことになりました。研究室は、知能・機能創成工学専攻の発足当時のマイクロ動力学講座<sup>1)</sup>の名称を再び掲げ、マイクロ動力学領域(中谷・土井研究室)として新しくスタートを切ることになります。当研究室では固体構造の力学特性の発現に関わる非線形性の強い力学現象のメカニズムの解明とその積極的な応用を目指した研究をさらに広い視点から発展的に進めていく予定です。2020年4月現在、構成員は、筆者と、土井祐介准教授、永島壮助教、大学院生12名、学部研究生1名、学部生9名です。

## 非なるものへ挑戦する力学研究

研究室は〈非なるものへの挑戦の場〉と位置づけています。「非線形、非弾性、非構造、そして、非日常こそリアルな世界である。無意識的、慣習性束縛、こだわり、安逸等々から自己を解放しよう。」という標語を掲げて、表1に示すような、リアリティ(=非なるもの)への挑戦をモットーとしてい

ます。これらは、筆者が学生のころから非古典的な問題に挑戦する際の指導原理を与えてくれています。

表1 非なるものへの挑戦

線形から非線形へ:	線形論の呪縛からの脱却
弾性から非弾性へ:	元の形に復する現象からは新しいものは生まれません
構造から非構造へ:	剛なる形は幻影ではないのか、境界とは何か
静的傍観から動的把握へ:	時間は確実に流れ、すべての現象は動的に推移している
孤立系、閉鎖系から開放系へ:	あらゆる物理量は外部と相互作用している、内部と外部という区別に意味はあるのか
受動的応答から能動的応答へ:	機能化とは必然的に能動的な挙動である
現象論から実体論へ:	マイクロ動力学(微視的にみる意義)、マルチスケール理論
技術は文化を育むか:	.....

学生の教育では「力学以修己」を掲げています。これは大阪大学の源流の一つとされる懐徳堂の中門に竹聯(ちくれん)として記されていた漢語で、「学を力めて以て己を修む」と読むのが通例だそうです。「力学を以て己を修む」とも読むのも必ずしも間違いではないとの説を信じて、研究室では力学教育を通じて、論理的思考力を育み伸ばす人材育成を進めています。

以下では、研究室の取り組みのいくつかを紹介させていただきます。

## 理論と計算のハイブリッドによる非線形局在モードの理解

表1に記したように、物質系の本質は開放系です。そこではエネルギーは必然的に散逸していくのが熱力学の法則であり、それに抗うことは通常できません。生体を含む多様な構造にみられる定常性・恒常性は、むしろ外界からの物質・エネルギーの流束の



\* Akihiro NAKATANI

1965年9月生まれ  
大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 博士後期課程修了(1993年)  
現在、大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 教授 博士(工学)  
専門/知能・機能創成工学、材料力学、計算力学  
TEL : 06-6879-7244  
FAX : 06-6879-7246  
E-mail : nakatani@mech.eng.osaka-u.ac.jp

中でこそ実現可能なものであるといえます。ところが、ごく限られた空間領域の少数の自由度の協調によって周期運動が実現され、エネルギーが散逸しない局在モードという現象が見られます。二重否定で〈非〉非定常といってもよいかもしれません。

エネルギーが一か所にとどまるメカニズムを線形理論で理解することは不可能ですが、非線形理論によってその存在を論じることができます。非線形性をもって相互作用する離散系（あるいは微視的構造や非局所性を理論の枠組みに取り入れた一般化連続体系）がその理解の鍵であり、このような局在モードは非線形局在モード（intrinsic localized mode）/ 離散ブリーザー（discrete breather）と呼ばれ注目を集めています。

研究室では、土井准教授を中心に、研究課題「結晶構造における非線形ダイナミクスの新しい視点からの理解」を進めています。計算機シミュレーションと理論解析を組み合わせたハイブリッド法を提案し、非線形運動方程式で記述される非線形力学システムに出現する複雑で多様なダイナミクスを解析することに成功しています。図1は、原子の非線形ダイナミクスを分子動力学シミュレーションと周期解探索法を結合した解析手法によって解析し、数原

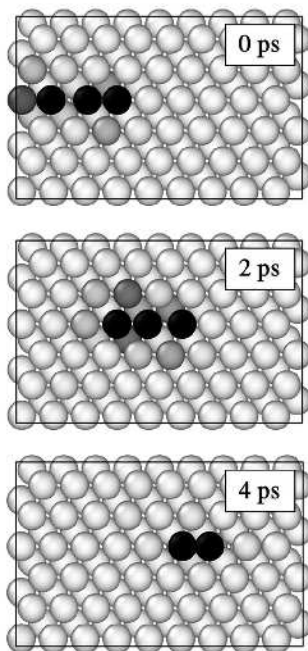


図1 体心立方晶における移動型非線形局在モード。原子数個に局在した振動モードが局在したまま結晶内を移動している。

子間隔の空間に局在した振動モードの存在と静止型・移動型の解を数値的に見出した結果を示しています。非線形局在モードの安定性や動的構造を解析することにより、結晶構造のどのような特徴が局在エネルギー構造の存在に関係しているかを明らかにします。

数理的な観点からの基本的性質の解明にとどまらず、その工学的応用を目指した研究にも挑戦し、局在性を保ったまま結晶内を伝ばする移動型非線形局在モードの解析を通じて、フォノン熱伝導などとは全く異なる新奇のエネルギー輸送を取り扱う学理構築を目指します。

### 薄膜-基板系の凹凸パターン構造の自律形成

不安定現象は、構造が元に戻らない、よりエネルギーの小さな新しい構造を自発的に見つけ出す状態遷移過程です。そのような不安定性によって駆動される自己組織化を積極的かつ安全に利用することができれば、機能構造形成のための方法論を構築できます。

研究室では、永島助教を中心に、硬質薄膜と軟質基板から成る薄膜-基板系のパターン形成に関する研究を行っています。この系に面内圧縮ひずみを付与すると、図2に示すようなリンクルと呼ばれる波状構造がナノ・マイクロスケールの凹凸パターン構造として系表面に自律形成されます。この系の面白さの一つは、部分部分は弾性であってもその複合化によりシステム全体としては非弾性の状態遷移挙動を示すところにあります。そのメカニズムは座屈

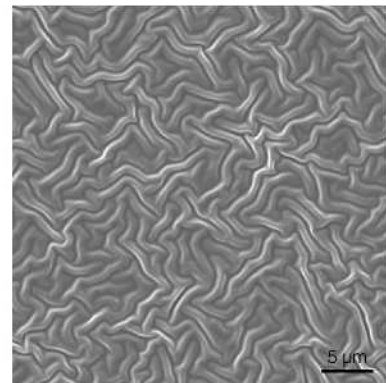


図2 代表的なリンクルの走査型電子顕微鏡画像。(ポリジメチルシロキサン基板表面をアルゴンプラズマ処理したのちダイヤモンドライカーボン薄膜を蒸着して作製)

と呼ばれる不安定現象・分岐現象であり、薄膜および基板それぞれの弾性特性や面内圧縮ひずみ量などのパラメータによってパターン構造や周期を制御できることがわかっています。さらに、周期の異なるリンクルが重畳して形成される階層リンクル (hierarchical wrinkles) や、リンクルがフォールドと呼ばれる折畳構造へと変形する現象 (wrinkle-to-fold transition) のメカニズムが、非定常解析により明らかにされつつあります。

さらに研究課題「水の表面張力が駆動する薄膜リンクル構造の変形現象に関する研究」において、機能表面との水の表面張力により、微小空間での固体流体連成問題というマルチフィジックス系の研究課題を進めています。このような変形制御に関するメカニズムの解明を通じて、獲得した知見を根本原理とする汎用性・安全性・微細加工能に優れたボトムアップ型微細加工技術の構築につながると考えています。その応用は、ナノマテリアル内包型開閉式ナノチャネルやDNA ナノワイヤーアレイなど様々な機能性人工物の創製に結びつくことが期待されます。

### 非なる力学の体系化への挑戦

筆者の最近の取り組みでは、微視的構造の不安定性に注目し、変形体の構造変化を記述する場の汎関数としてのエネルギー曲面について、微視的な多重安定性に起因する巨視的力学特性の評価やエネルギー曲面の凸性の動的消失を積極的かつ安全に利用するための力学理論の構築に関心を持って研究を進めています。そして、具体的には、研究課題「微視回転型不安定機構と予応力場を内在する力学的メタマテリアルの粗視化計算固体力学」および「ケーブルの応力弛緩性と冗長性に基礎をおくテンセグリティネットワーク構造体の機能化」を進めています。これらの解析を通じて、非平衡、幾何非線形性、非局所性などの〈非〉古典的な固体力学の体系化に取り組んでいます。

### おわりに

不安定理論というと、約50年前にルネ・トムによって提唱されたカタストロフ理論が有名です。報告書「形態形成の力学理論」<sup>2)</sup>で紹介され、著書「構造安定性と形態形成」<sup>3)</sup>の出版と同時に自然科学のみならず生物・経済・心理・言語学など幅広い分野

への応用を巡って大きな反響を呼んだとのこと。変革・破滅的な災害・悲劇的結末などの意で用いられるカタストロフィーという言葉は、先行き不透明な混沌とした現代の世相を言い表しているかのようです。しかし、破壊と創造は表裏一体、変容・変革は創造の源でもあり、非への挑戦、実は何か活力を与えてくれるものに思えます。

現在の不安定性理論の基礎は19世紀に遡ります。理論応用力学分野の先人たちの考察には、筆者の浅学ではなかなか到達できないのですが、巨人の肩に乗って研究できる可能性があるとするれば、昨今の付加製造技術などの新しい造形プロセスの開発と微細構造の制御技術の進歩や、高性能化したコンピューターを援用できるという環境にある点が先人に対して大きなアドバンテージがあります。機械は材料からできているというのが従来の常識だとすれば、機械の仕組みを持った材料の開発といった、常識を覆すスケール階層性の認識の転回が生まれる可能性があります。また、公理から出発して数理モデル、構成関係式を定式化、統計力学などの粗視化手法によっていた力学研究の解析的方法は、前世紀末には直接シミュレーションへの代替が進みました (例えば、筆者の本誌への寄稿<sup>4)</sup>) が、今後はAI技術やデータ圧縮技術がさらにそれを置き換える (筆者は最近 Constitutive 4.0 と呼んでいます) 可能性があります<sup>5)</sup>。

トムの報告書の終盤で当時の生物学の現象論を「機械仕掛けの神」(Deus Ex Machina) に喩えて痛烈に批判して、構造・メカニズムの理解の必要性を説いているくだりがあります。映画エクス・マキナ (2015 英) では「機械仕掛けの神」がAIロボットのイメージに重ねて描かれています。今の各研究分野へのAI的方法論の導入に向けた動向は、はたして現象論からの脱却なのか、現象論への回帰なのかどちらなのかなどと思いつつ、非なるものへの挑戦の場でスタッフ・学生の多様な個性の協調とぶつかり合い (トムの言葉を借りれば〈闘争〉や〈分岐〉) の集まりが、学術の時間発展を駆動し前進させることにつながることを期待しています。

最後に、本稿執筆の機会を下さいました工学研究科桑原裕司先生、梶島岳夫先生、ならびに、お世話になりました事務局の巽昭夫様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 工学部創始100周年史編集委員会編:大阪大学工学部創始百年史, (1997), pp.12-13.
- 2) ルネ・トム, E. C. ジーマン, 宇敷重広, 佐和隆光:形態と構造ーカタストロフの理論ー, (1977), みすず書房.
- 3) R. トム (著), 彌永昌吉, 宇敷重広 (訳):構造安定性と形態形成 (原書第2版), (1980), 岩波書店.
- 4) 中谷彰宏:離散転位動力学による結晶体の力学特性評価, 生産と技術, 第49巻, 第3号 (1997), pp.49-52.
- 5) 中谷彰宏 (分担執筆):計算力学・計算固体力学, 日本機械学会編 機械工学年鑑, (2017), pp.10-11.

